



# William D. Nordhaus : Intégrer le changement climatique dans l'analyse macroéconomique de long terme

**Katheline Schubert**

DANS **REVUE D'ÉCONOMIE POLITIQUE** 2019/6 Vol. 129 , PAGES 887 À 908  
ÉDITIONS **DALLOZ**

ISSN 0373-2630

DOI 10.3917/redp.296.0887

Date de mise en ligne : 13/02/2020

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-d-economie-politique-2019-6-page-887?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...  
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



**Distribution électronique Cairn.info pour Dalloz.**

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur [cairn.info/copyright](https://cairn.info/copyright).

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

# William D. Nordhaus : Intégrer le changement climatique dans l'analyse macroéconomique de long terme

---

Katheline Schubert\*

Cet article s'inscrit dans la tradition de la Revue d'Économie Politique de présenter chaque année les contributions des nouveaux « prix Nobel d'économie ». Il est consacré à William Nordhaus, récompensé pour avoir intégré le changement climatique dans l'analyse macroéconomique de long terme. Je présente tout d'abord le modèle DICE, en détaillant ses équations et la manière dont est effectuée la calibration. Je montre ensuite comment DICE est utilisé pour calculer le coût social du carbone. Je détaille enfin un certain nombre des très nombreuses extensions du modèle qui existent à ce jour, pour mettre en évidence la puissance du cadre d'analyse, ses limites aussi, et les voies de progrès.

**William Nordhaus – prix Nobel – DICE – modèles d'évaluation intégrée – économie du climat**

## *William D. Nordhaus: Integrating Climate Change into Long-Run Macroeconomic Analysis*

---

This article follows the tradition of the Revue d'Économie Politique of presenting each year the new “Nobel prices in economics” contributions. It is dedicated to William Nordhaus, rewarded for having integrated climate change into long-run macroeconomic analysis. I first present the DICE model, explaining in detail the equations of the climate and economic sub-models as well as the calibration procedure. I then show how DICE is used to compute the social cost of carbon. Lastly, I present some of the very numerous extensions of the model at date, to highlight the power of the framework, its limits too, and the ways forward.

**William Nordhaus – Nobel price – DICE – integrated assessment models – climate economics**

*JEL codes : 04, 044, Q5, Q54*

## 1. Introduction

Le 50ème prix de la Banque de Suède à la mémoire d'Alfred Nobel, le « prix Nobel d'économie » a été attribué le 8 octobre 2018 à William Nord-

---

\* Paris School of Economics, Université Paris 1. Email : [Katheline.Schubert@univ-paris1.fr](mailto:Katheline.Schubert@univ-paris1.fr)

haus, « *for integrating climate change into long-run macroeconomic analysis* », et Paul Romer.

William Nordhaus a en effet été le premier économiste à intégrer dans la macroéconomie de long terme la question du changement climatique. Ses travaux initiaux en ce sens datent de près d'un demi-siècle. Dans les années 70, les rares économistes s'intéressant aux relations entre l'économie et l'environnement focalisaient leurs recherches sur les conséquences de la rareté des énergies fossiles sur la croissance économique (Solow [1974], Stiglitz [1974], Dasgupta et Heal [1974]). Le premier choc pétrolier venait de frapper l'économie mondiale, et on parlait encore fort peu du changement climatique. Plutôt que de s'intéresser aux gisements d'énergies fossiles c'est-à-dire au carbone accumulé dans le sol, Nordhaus mit l'accent sur le carbone accumulé dans l'atmosphère. Le second n'est pas l'exact miroir du premier (au travers de la combustion des énergies fossiles), car des phénomènes complexes entrent en jeu, que Nordhaus va s'attacher à décrire de façon simple, pour pouvoir incorporer dans un petit modèle de croissance de long terme l'essence de la science du climat. Finalement le temps a montré que Nordhaus avait raison : ce n'est pas la rareté des énergies fossiles qui menace notre économie et notre civilisation, mais c'est le changement du climat provoqué en particulier par la combustion de ces énergies fossiles.

Les premiers modèles de Nordhaus, datés de 1975 et 1977, sont des modèles énergétiques d'équilibre partiel dans lesquels la production est exogène<sup>1</sup> (Nordhaus [1975, 1977]). Le premier modèle d'équilibre général, datant du début des années 90, est le modèle DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) (Nordhaus [1991, 1992, 1993a, 1993b, 1994]). Cette première version a été suivie de nombreuses autres, raffinant les spécifications du module économique et du module climatique et la calibration au fur et à mesure du progrès des connaissances. Elle a également été suivie d'une version régionalisée (12 régions) : le modèle RICE (Nordhaus et Yang [1996]). Les versions successives de DICE et RICE sont documentées et disponibles librement (en GAMS et EXCEL) sur la page internet de William Nordhaus à Yale, ce qui en rend l'appropriation et l'utilisation par les autres chercheurs faciles. Ils ne s'en sont pas privés : nous verrons plus loin que DICE a donné lieu à de très nombreux avatars.

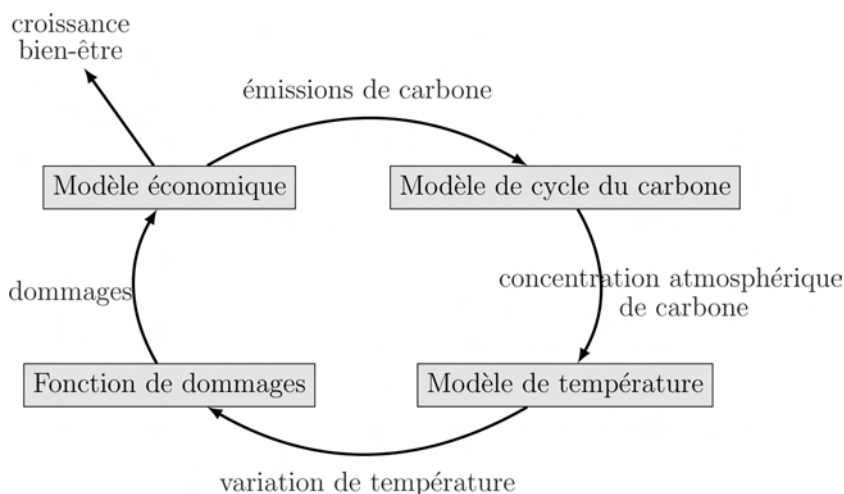
Avec DICE, Nordhaus a créé le premier *modèle d'évaluation intégrée* – *Integrated Assessment Model* (IAM). Les IAM couplent un modèle économique et un modèle physique décrivant de façon simplifiée le système climatique. Ce dernier modélise la façon dont l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère due à l'activité humaine, issue du modèle économique, se traduit en augmentation de la température terrestre. À son tour, l'augmentation de la température terrestre provoque des dommages, qui sont introduits dans le modèle économique. La figure 1 représente de façon schématique la structure de base de ces modèles.

Les IAM sont des modèles empiriques. La première étape suivant leur spécification théorique consiste à constituer une base de données histo-

1. Nordhaus précise qu'il s'est inspiré dans ces travaux de Manne [1976].

riques et calibrer les paramètres. Ensuite, un scénario *business as usual* (BAU) qui permet d'explorer la façon dont l'économie et le climat évolueraient si aucune politique climatique nouvelle n'était mise en place est construit. Il nécessite d'effectuer un certain nombre d'hypothèses cruciales, en particulier sur le progrès technologique et la croissance de la population sur un horizon de plusieurs siècles. Puis les modèles sont utilisés pour calculer le *coût social du carbone* (CSC). Le CSC est la valeur monétaire présente de la réduction des dommages climatiques présents et futurs provoquée par une réduction d'une tonne des émissions de CO<sub>2</sub>. C'est un outil central de la politique climatique puisqu'il indique l'ampleur des efforts d'abattement que la société doit réaliser. Enfin, les modèles permettent de chiffrer les coûts et les bénéfices de différentes options de politique climatique.

**Figure 1. Les modèles d'évaluation intégrée : la structure de base**



Les IAM à la DICE sont de petite taille et les mécanismes qu'ils incorporent sont transparents. Il existe aujourd'hui des dizaines d'autres IAM. Ils n'ont pas tous des fondements théoriques aussi fermes que ceux de DICE. Certains d'entre eux abandonnent les fondements microéconomiques et l'optimisation intertemporelle sous anticipations parfaites, et introduisent des formalisations *ad-hoc*, censées mieux représenter le monde réel. Ils peuvent être de très grande taille (des centaines de milliers d'équations parfois) et très complexes. Le grand avantage de ces très gros modèles par rapport aux petits modèles compacts réside dans leur degré de désagrégation, géographique et sectorielle, dans le détail avec lequel ils représentent les technologies, présentes et futures, dans leur capacité à décrire les dommages beaucoup plus finement, dans leur représentation plus complète des phénomènes physiques. En contrepartie, leur inconvénient est qu'ils sont difficiles à appréhender autrement que comme des boîtes noires.

La très grande majorité des IAM existants, dont DICE, sont des modèles déterministes. Compte tenu des marges d'erreur très importantes dans la spécification et la calibration de ce type de modèles, sur lesquelles je reviendrai plus bas, ceci constitue une sérieuse limite, que les modélisateurs tentent de pallier par des analyses de sensibilité plus ou moins sophistiquées.

Les IAM sont en effet soumis à de violentes critiques. Robert Pindyck, l'un des critiques les plus virulents, écrit : « *(integrated assessment models) have crucial flaws that make them close to useless as tools for policy analysis* » (Pindyck [2013]). Ou encore : « *IAM-based analyzes of climate policy create a perception of knowledge and precision that is illusory and can fool policy-makers into thinking that the forecasts the models generate have some kind of scientific legitimacy. Despite the fact that IAMs can be misleading as guides for policy, they have been used by the U.S. government to estimate the social cost of carbon (SCC) and evaluate tax and abatement policies* » (Pindyck [2017]).

Dans la suite de cet article je présente tout d'abord le modèle DICE, en détaillant ses équations et la manière dont est effectuée la calibration (section 2). La section 3 montre comment DICE est utilisé pour calculer le coût social du carbone. La section 4 enfin présente un certain nombre d'extensions du modèle. J'espère qu'au terme de l'article le lecteur se sera fait une idée non seulement des apports de William Nordhaus à l'économie du changement climatique, mais aussi de la portée des critiques qui sont adressées à DICE et aux autres IAM et des voies de progrès.

## 2. DICE

Je présente ici la dernière version disponible du modèle DICE, la version DICE 2016 R2 (Nordhaus [2018a]). Les équations du modèle n'ont changé que de façon marginale entre les différentes versions.

### 2.1. Le modèle économique

Le modèle économique est un modèle de croissance standard à la Ramsey en temps discret, dans lequel sont introduits les dommages dus au changement climatique et l'abattement.

La fonction de bien-être intertemporel s'écrit :

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^t} L_t \frac{c_t^{1-\gamma}}{1-\gamma} \quad [1]$$

où  $\rho > 0$  est le taux de préférence pure pour le présent,  $L_t$  la population,  $c_t$  la consommation par tête,  $\gamma > 0$  l'aversion à l'inégalité intergénérationnelle.

La production brute est représentée classiquement par une fonction Cobb-Douglas à rendements d'échelle constants :

$$Y_t = A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}, 0 < \alpha < 1 \quad [2]$$

où  $A_t$  est la productivité globale des facteurs et  $\alpha$  l'élasticité de la production au capital.

La production nette des dommages et des coûts d'abattement est :

$$Q_t = (1 - D_t)(1 - A_t)Y_t \quad [3]$$

où  $A < 1$  est le coût d'abattement (en termes de perte de production) et  $D < 1$  le dommage climatique (en terme de perte de production également).

Le coût d'abattement est fonction du taux de contrôle des émissions  $\mu_t$  :

$$A_t = \theta_{1,t} \mu_t^{\theta_2}, \quad \theta_1 > 0, \theta_2 > 1 \quad [4]$$

Le paramètre  $\theta_2$  est supérieur à 1 pour exprimer le fait que le coût d'abattement est convexe : quand  $\mu$  augmente, une fraction de plus en plus grande de la production est utilisée pour l'abattement.

L'équation d'accumulation du capital est standard :

$$K_{t+1} = Q_t - C_t + (1 - \delta_k)K_t \quad [5]$$

où  $\delta_k \in (0, 1)$  est le taux de dépréciation du capital.

Enfin, les émissions de gaz à effet de serre sont égales à la somme des émissions de carbone, proportionnelles à la production brute corrigée de taux de contrôle des émissions, et des émissions provenant du changement d'usage des sols, exogènes :

$$E_t = \sigma_t (1 - \mu_t)Y_t + E_t^{land} \quad [6]$$

où  $E_t^{land}$  représente les émissions provenant du changement d'usage des sols.  $\sigma_t$  est l'intensité carbone de la production. Elle est exogène mais non constante : elle diminue au cours du temps pour refléter le progrès technologique dans la decarbonation de la production. Notons que le taux de contrôle des émissions n'est pas borné supérieurement par 1. Il peut devenir supérieur à 1 à partir d'une certaine date dans le futur, ce qui signifie que le modèle ouvre la possibilité d'émissions négatives, à travers par exemple la capture directe des molécules de carbone dans l'atmosphère. Notons également que le modèle suppose l'existence d'une technologie « backstop » produisant des services énergétiques sans carbone, à un coût exogène très élevé. Ceci signifie que tant que le coût social du carbone est inférieur à ce coût de la technologie backstop l'économie continue à utiliser de l'énergie carbonée, mais qu'au delà elle passe à une énergie propre et n'a plus besoin de faire de l'abattement.

## 2.2. Le cycle du carbone

Il s'agit maintenant de savoir ce que les émissions décrites ci-dessus deviennent au cours du temps. Les molécules de carbone restent-elles pour toujours dans l'atmosphère, ou disparaissent-elles, et, dans ce cas, comment ? Le modèle de cycle du carbone répond à ces questions.

Dans DICE, la représentation du cycle du carbone est du type stocks-flux, avec trois réservoirs : l'atmosphère, la biosphère et la couche supérieure de l'océan, et l'océan profond. Quand une molécule de carbone est émise dans l'atmosphère, elle peut y demeurer ou être absorbée par la biosphère et la couche supérieure de l'océan. Une molécule ainsi absorbée peut demeurer dans ce réservoir, ou être absorbée par l'océan profond. Des échanges de carbone existent également dans l'autre sens : la biosphère par exemple peut relâcher du carbone vers l'atmosphère. Ces échanges entre les trois réservoirs sont décrits dans DICE par le système dynamique linéaire suivant :

$$\begin{pmatrix} M_t - M_{t-1} \\ M_t^U - M_{t-1}^U \\ M_t^L - M_{t-1}^L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\phi_{12} & \phi_{21} & 0 \\ \phi_{12} & -(\phi_{21} + \phi_{23}) & \phi_{23} \\ 0 & \phi_{23} & -\phi_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{t-1} \\ M_{t-1}^U \\ M_{t-1}^L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_t \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [7]$$

où  $M_t$ ,  $M_t^U$ , et  $M_t^L$  mesurent respectivement les masses (la concentration) de carbone dans les trois réservoirs, atmosphère, biosphère et couche supérieure de l'océan, et océan profond. Les paramètres  $\phi_{ij}$ , coefficients de diffusion entre les trois réservoirs, sont tous positifs. Remarquons que la somme des lignes de la matrice est nulle : mises à part les émissions, toute entrée de carbone dans l'un des réservoirs en provenance d'un autre est compensée par une sortie équivalente. Le carbone ne disparaît pas ! Remarquons également que la variation au cours du temps de la concentration de carbone dans chaque réservoir est proportionnelle à la concentration initiale, le coefficient de proportionnalité étant constant. Par exemple, la variation de la concentration de carbone de l'océan profond  $M_t^L - M_{t-1}^L$  est proportionnelle à la concentration de carbone dans la biosphère et la couche superficielle de l'océan à la date précédente  $M_{t-1}^U$ , avec un coefficient de proportionnalité  $\phi_{23}$  constant, et à la concentration de carbone dans l'océan profond lui-même à la date précédente  $M_{t-1}^L$ , avec un coefficient de proportionnalité  $-\phi_{23}$  constant également.

Cette représentation linéaire à coefficients constants du cycle du carbone a le mérite d'être simple. Mais elle néglige de potentielles non-linéarités des phénomènes d'absorption, et le fait que les coefficients peuvent eux-mêmes être affectés par les émissions : par exemple, des émissions très élevées peuvent entraîner la baisse de la capacité des océans à stocker du carbone.

## 2.3. Le modèle de température

L'étape suivante consiste à relier la concentration de carbone dans l'atmosphère et l'augmentation de la température terrestre moyenne, comparée à sa valeur pré-industrielle.

On calcule tout d'abord le *forçage radiatif* résultant de la concentration de carbone dans l'atmosphère. C'est la différence entre le rayonnement solaire entrant absorbé par la terre et l'énergie renvoyée par radiation dans l'espace. Une plus grande concentration de carbone dans l'atmosphère réduit le flux d'énergie sortant, et ainsi augmente le forçage radiatif. Le phénomène, décrit par d'Arrhenius [1896], est bien représenté par une fonction logarithmique. La loi d'Arrhenius s'écrit ainsi :

$$F_t = \frac{\eta}{\ln 2} \ln \left( \frac{M_t}{M_{preind}} \right) + F_t^{other} \quad [8]$$

Le paramètre  $\eta$  mesure le forçage radiatif résultant d'un doublement de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$ .  $F_t^{other}$  représente le forçage radiatif dû aux autres gaz à effet de serre.

La variation de température induite par un forçage radiatif  $F$  est donnée par :

$$\begin{aligned} T_t &= T_{t-1} + \zeta_1 (F_t - \zeta_2 T_{t-1} - \zeta_3 (T_{t-1} - T_{t-1}^O)) \\ T_t^O &= T_{t-1}^O + \zeta_4 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \end{aligned} \quad [9]$$

où  $T$  est la température de surface moyenne (atmosphère et couche supérieure de l'océan) et  $T^O$  la température de l'océan, toutes deux exprimées en déviations par rapport à leur niveau pré-industriel.

Le paramètre  $\zeta_1$  représente la vitesse d'ajustement de la température de surface à un changement du forçage radiatif. Le terme  $\zeta_2 T_{t-1}$  exprime le fait que lorsque la température augmente le flux d'énergie sortant augmente également (un corps plus chaud irradie plus d'énergie). C'est la *rétroaction de Planck*, qui vient modérer le réchauffement dû au forçage radiatif additionnel.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du modèle de température, supposons qu'à partir d'un état stationnaire initial (période 1) où  $T_1 = T_1^O = T^*$  et  $F^* = \zeta_2 T^*$  le forçage radiatif devienne de façon permanente  $F > F^*$ . Alors  $T_2 = T^* + \zeta_1 (F - \zeta_2 T^*) = T^* + \zeta_1 (F - F^*) > T^*$  tandis que  $T_2^O = T^*$ . L'océan ne réagit pas tout de suite au changement de forçage radiatif, au contraire de l'atmosphère terrestre qui commence à se réchauffer immédiatement, d'autant plus que  $\zeta_1$  est élevé. La nouvelle température stationnaire s'établit à long terme à  $T^{**} = F/\zeta_2$ .

Revenons enfin à l'équation (8). Si  $\frac{M}{M_{preind}}$  se stabilise à 2,  $F = \eta$  et la nouvelle température stationnaire s'établit à  $\frac{\eta}{\zeta_2}$ . On nomme cette dernière grandeur la *sensibilité climatique d'équilibre*.

## 2.4. La fonction de dommages

La dernière étape consiste à relier l'augmentation de température et les dommages économiques qu'elle provoque. L'hypothèse sous jacente est que la température moyenne globale est une statistique suffisante pour expliquer les dommages globaux. Dans un modèle très agrégé comme DICE une telle fonction globale va nécessairement être très imprécise. En effet, les dommages sont très hétérogènes dans les différentes régions du monde et les différents secteurs d'activité, et les agréger pour obtenir une fonction de dommage global moyen est tâche difficile. En outre, nous avons expérimenté jusqu'à présent une augmentation de température de 1°C par rapport à l'ère pré-industrielle, ce qui nous renseigne assez peu sur les dommages qui peuvent apparaître pour 3, 4 ou 5 degrés supplémentaires, et les coûts associés. Pour mettre les choses en perspective, notons qu'il n'y a pas eu de période où la température moyenne globale a été supérieure de 4°C à la température pré-industrielle depuis au moins 10 millions d'années. Ou encore, que - 4°C correspond à la température moyenne de la dernière ère glaciaire, au cours de laquelle l'humanité a failli disparaître.

La fonction de dommages de DICE est quadratique :

$$D_t = \psi_1 T_t + \psi_2 T_t^2, \psi_1 \geq 0, \psi_2 > 0 \quad [10]$$

## 2.5. Calibration et résolution

### 2.5.1. Calibration

L'étape de calibration du modèle est cruciale. En effet, des valeurs données aux paramètres dépendront les résultats des simulations, et les ordres de grandeur de variables d'importance majeure pour la politique climatique, telles que le coût social du carbone.

Le pas du modèle est de 5 ans. La date  $t=1$  correspond à la période 2015-2019. Les stocks sont mesurés en début de période.

Le tableau 1 donne les principaux paramètres et variables exogènes et leur valeur dans la version DICE 2016 R.

Tableau 1. Les paramètres de DICE 2016 R. Source : Nordhaus [2018a]

| paramètre                                      | description                                                | valeur                                    |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $\gamma$                                       | aversion à l'inégalité intertemporelle                     | 1,45                                      |
| $\rho$                                         | taux de préférence pure pour le présent                    | 1,5 % par an                              |
| $\alpha$                                       | élasticité de la production au capital                     | 0,3                                       |
| $\frac{A_t - A_{t-1}}{A_{t-1}}$                | taux de croissance de la productivité globale des facteurs | 2,1 % par an avant 2050, 1,9 % après 2100 |
| $\theta_{1,t}$                                 | paramètre d'échelle de la fonction de coût d'abattement    | $0,0741 + 0,0904^{t-1}$                   |
| $\theta_2$                                     | paramètre de concavité du coût d'abattement                | 2,6                                       |
| $\frac{\sigma_t - \sigma_{t-1}}{\sigma_{t-1}}$ | taux de croissance de l'intensité carbone de la production | - 1,5 % par an                            |
| $\frac{\sigma_{t-1}}{\bar{\mu}}$               | taux de contrôle des émissions maximal                     | 1 avant 2150, 1,2 après                   |
| $\frac{\eta}{\xi_2}$                           | sensibilité climatique d'équilibre                         | 3,1°C                                     |
| $\psi_1$                                       | paramètre de la fonction de dommage (terme linéaire)       | 0                                         |
| $\psi_2$                                       | paramètre de la fonction de dommage (terme quadratique)    | 0,227                                     |

Les deux premiers paramètres dans le tableau 1 sont des paramètres normatifs dont le choix est laissé à la discrétion du modélisateur : le degré d'aversion à l'inégalité intertemporelle  $\gamma$  et le taux de préférence pure pour le présent  $\rho$ .

Nordhaus choisit ces deux paramètres de sorte que la simulation de base de DICE reproduise le taux d'épargne et le coût du capital observés, soit pour ce dernier 4,25 % par an, jusqu'à 2100. Cette démarche correspond à l'approche descriptive de l'actualisation (Arrow *et al.* [1996]) par opposition à l'approche prescriptive, résolument normative, adoptée par exemple dans la Stern Review (Stern [2007, 2008]). Je ne reviendrai pas ici sur la célèbre controverse Nordhaus-Stern concernant le taux d'actualisation social, tant le choix de ce taux a déjà fait couler d'encre, sans que ne se dégage le moindre consensus parmi les économistes.

Les paramètres suivants sont des paramètres « techniques », calibrés à partir de données observées.

La valeur de l'élasticité de la production  $\alpha$  est standard dans les fonctions de production Cobb-Douglas.

La fonction de coût d'abattement est calibrée en utilisant celles des autres IAM représentés dans l'étude *Modeling Uncertainty Project* (Gillingham *et al.* [2018]). Le paramètre  $\theta_1$  s'interprète de la façon suivante. Supposons qu'à la période  $t = 1$  (aujourd'hui) on désire atteindre des émissions nulles. On doit alors avoir  $\mu_1 = 1$ , ce qui requiert un coût d'abattement de  $A_1 = \theta_1 = 0,00741$ , c'est-à-dire 7,41 % du PIB. Puis ce taux baisse de 9,04 % par périodes de 5 ans, c'est-à-dire environ de 2 % par an. Le paramètre  $\theta_2$  quant à lui mesure la convexité de la fonction de coût d'abattement. Il est très supérieur à 1, indiquant des coûts fortement convexes.

La sensibilité climatique d'équilibre est calibrée en suivant Olsen *et al.* [2012].

La façon dont est calibrée la fonction de dommages a évolué entre les versions 2013 R et 2016 R de DICE. Dans la version 2013 R, la calibration repose sur les résultats de Tol [2009]. Mais il a été montré que cette étude comporte plusieurs erreurs numériques (Journal of Economic Perspectives [2015]). Nordhaus a alors entrepris un travail spécifique pour recalibrer la fonction de dommages (Nordhaus et Moffat [2017]). Pour estimer la fonction de dommages quadratique, Nordhaus et Moffat [2017] utilisent les résultats des 27 études disponibles qui présentent divers dommages climatiques, auxquels sont ajoutés 25 % pour prendre en compte les dommages omis et les dommages catastrophiques. Avec cette nouvelle calibration, les dommages s'élèvent à 2 % du produit global pour une augmentation de température de 3°C, et à 7,9 % du produit global pour une augmentation de température de 6°C.

Les données sur le taux de croissance de la population proviennent des projections des Nations Unies, les données sur les émissions de CO<sub>2</sub> du Carbon Dioxide Information Analysis Center et celles sur le forçage radiatif des autres gaz du 5ème rapport du GIEC.

Enfin, les paramètres du cycle du carbone (non repris dans le tableau 1) sont calibrés en utilisant Archer *et al.* [2009].

## 2.5.2. Résolution

DICE peut être utilisé comme un modèle de croissance optimale dans lequel la trajectoire de l'économie est optimisée par un planificateur maximisant le bien-être social intertemporel, ou comme un modèle d'équilibre général décentralisé dans lequel l'externalité climatique n'est pas internalisée. On obtient dans le premier cas le sentier de croissance optimal et dans le second le sentier BAU.

Les variables d'état sont le stock de capital  $K$ , la concentration atmosphérique de carbone  $M$  et la température atmosphérique  $T$  (les autres variables de stocks,  $M^U$ ,  $M^L$  et  $T^O$  sont des variables intermédiaires, au sens où elles ne sont contrôlées qu'indirectement) ; les variables de contrôle sont la consommation par tête  $c$  et le taux de contrôle des émissions  $\mu$ .

Les variables exogènes sont les émissions dues au changement d'usage des sols  $E^{land}$  et le forçage radiatif des autres gaz à effet de serre  $F^{other}$ .

## 3. Le coût social du carbone

Le coût social du carbone (CSC) est la valeur présente du flux de dommages résultant d'une unité marginale d'émissions de carbone. C'est un élément central de la politique climatique, puisqu'il indique l'ampleur des efforts d'abattement que la société doit accomplir pour atteindre l'objectif

climatique qu'elle s'assigne. DICE est l'un des IAM utilisés par les gouvernements et les institutions internationales pour estimer le CSC.

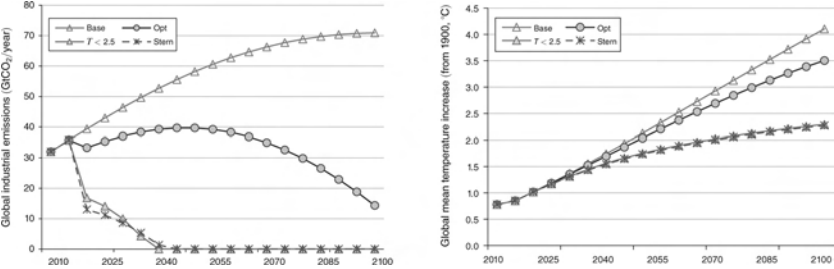
Quand il n'y a pas d'autres imperfections de marché interagissant avec l'externalité climatique (ce qui est le cas dans DICE, si ce n'est dans la réalité), le CSC coïncide avec la taxe carbone optimale. DICE permet donc de calculer le niveau initial et le profil temporel de la taxe carbone permettant de ramener les dommages à leur niveau optimal ou de contenir le réchauffement climatique en dessous d'un certain seuil.

3.1. Scénarios

Je présente maintenant à titre d'illustration l'exercice de simulation le plus récent publié par Nordhaus (Nordhaus [2018a]). DICE 2016 R est simulé pour chiffrer les conséquences de quatre scénarios :

- *Baseline* : pas de politique climatique autre que celle déjà en place en 2015, c'est-à-dire scénario BAU ;
- *Optimal* : maximisation du bien-être social à partir de 2015 (période 1) ;
- *T < 2.5* : maximization du bien-être social à partir de 2015, sous la contrainte additionnelle que l'augmentation de température n'excède pas 2,5°C<sup>2</sup> ;
- *Stern* : maximization du bien-être social à partir de 2015, avec un taux de préférence pure pour le présent  $\rho = 0.1\%$  par an, valeur retenue dans la Stern Review (Stern [2007]).

Figure 2. Évolution des émissions et de la température dans les différents scénarios. Source : Nordhaus [2018a], figures 2 et 4



Le modèle est résolu pour un grand nombre de jeux de paramètres, afin de traiter l'incertitude paramétrique (voir plus bas). La figure 2 présentent les résultats de ces simulations pour les valeurs médianes des paramètres.

2. Contenir l'augmentation de température à 2°C n'est pas faisable dans ce modèle sans recourir à des émissions négatives, en raison de l'inertie du système climatique et des hypothèses de croissance assez forte à moyen terme (fondées sur le survey de Christensen *et al.* [2018]).

Les émissions augmentent très fortement dans le scénario BAU, et la température en 2100 excède de plus de 4°C la température pré-industrielle.

Dans le scénario optimal au sens de DICE, les émissions continuent à augmenter jusqu'à 2050 environ, avant de se mettre à diminuer fortement ; la température augmente tout au long de la période jusqu'à atteindre + 3,5°C en 2100. La comparaison du BAU et du scénario optimal montre clairement à quel point le système climatique est inerte : la très forte baisse des émissions à partir de 2050 dans le scénario optimal permet juste de gagner 1/2°C de température en 2100.

Le scénario dans lequel la hausse de température est contrainte à + 2,5°C et le scénario optimal avec le taux de préférence pour le présent de Stern donnent des résultats très semblables. La réduction des émissions y est extrêmement rapide, nécessitant un effort très important dans le futur proche. La neutralité carbone est atteinte en 2040 environ.

La comparaison des scénarios optimaux avec les taux de préférence pour le présent de Nordhaus et de Stern montre le rôle absolument crucial du taux de préférence pour le présent, mais ce n'est pas une surprise.

### 3.2. Le coût social du carbone

Le tableau 2 donne le coût social du carbone dans les 3 scénarios ci-dessus<sup>3</sup>. Le CSC est relativement faible dans le scénario optimal : 29,5\$ par tonne de CO<sub>2</sub> en 2015, environ 100\$ en 2050. Nous avons vu que dans un monde où la seule externalité serait l'externalité climatique le CSC serait égal à la taxe carbone optimale. La faiblesse de cette taxe carbone optimale est cohérente avec le fait que l'augmentation de température optimale en 2100 est de 3,5°C. Cette faiblesse est une constante des travaux de Nordhaus avec DICE. Elle laisse à entendre qu'il n'y a pas d'urgence à agir contre le réchauffement climatique et que la réponse de politique économique optimale est graduelle et relativement modérée, ce qui a beaucoup été reproché à Nordhaus par les économistes prônant une politique climatique plus agressive. En outre, présenter un scénario optimal dans lequel le réchauffement atteint 3,5°C est en contradiction forte avec les travaux scientifiques synthétisés dans le 5ème rapport du GIEC (IPCC [2014]).

**Tableau 2. Le coût social du carbone dans les trois scénarios.**  
**Source : Nordhaus [2018a]**

| CSC (2010 US\$) | 2015  | 2020  | 2025  | 2030  | 2050   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Optimal         | 29,5  | 35,3  | 41,8  | 69,2  | 99,6   |
| T < 2.5         | 184,1 | 229,0 | 284,0 | 351,0 | 1008,4 |
| Stern           | 256,5 | 299,6 | 340,7 | 381,7 | 615,6  |

3. Par définition, il n'y a pas de CSC dans le BAU.

Cependant, dans les travaux mêmes de Nordhaus, le coût social du carbone a été continûment augmenté au fil des révisions du modèle DICE. Le CSC pour 2015 est passé de 5\$ par tonne de CO<sub>2</sub> dans les premiers travaux à environ 30\$ aujourd'hui.

Nordhaus [2018b] reconnaît lui-même que ceci est très troublant, et l'attribue aux multiples incertitudes présentes à toutes les étapes de la modélisation : « *While this large a change is unsettling, it must be recognized that there is a large estimated error in the SCC. The estimated (5 %, 95 %) uncertainty band for the SCC in the 2016 R2 model is \$6 and \$93 per ton of CO<sub>2</sub>. This wide band reflects the compounding uncertainties of the temperature sensitivity, output growth, damage function, and other factors.* » La section suivante revient de façon détaillée sur cette question des incertitudes.

## 4. Extensions de DICE

La liste des IAM construits sur les fondements de DICE est longue, trop longue pour qu'il soit possible d'être exhaustif ici. Les extensions ont porté sur de nombreux aspects, qu'il s'agisse de modifier la spécification des équations (fonction de dommages, technologie de production, cycle du carbone...), de prendre en compte les multiples incertitudes ou de désagréger le modèle. Je me contente d'en évoquer quelques-uns qui me semblent particulièrement importants, en me focalisant sur les travaux les plus récents. Il faut noter que Nordhaus lui-même a exploré, avec divers co-auteurs, la majorité de ces aspects. Un résultat important est que l'incorporation dans DICE de ces nouveaux éléments conduit la plupart du temps à un coût social du carbone plus élevé que celui du DICE original.

### 4.1. Spécifications alternatives

Plusieurs économistes du changement climatique ont souligné que la forme quadratique de la fonction de dommages retenue dans DICE donne des dommages beaucoup trop faibles quand l'augmentation de température est grande (Stern [2008] ; Weitzman [2012]). Weitzman [2012] propose de remplacer la fonction quadratique par<sup>4</sup> :

$$D_t = 1 - \frac{1}{\pi_1 T_t + \pi_2 T_t^2 + \pi_3 T_t^\beta}$$

$\pi_3$  et  $\beta > 1$  étant choisis de sorte que pour  $T = 6$  °C, la perte de production soit de 50 %.

4. Dans les versions de DICE antérieures à 2012 la fonction de dommages était de la forme  $D_t = 1 - 1/(\psi_1 T_t + \psi_2 T_t^2)$ .

Dietz et Stern [2015] simulent avec DICE 2013 R (très proche de la version 2016) les conséquences d'une fonction de dommages à la Weitzman, et celles d'une calibration de la fonction de dommages quadratique telle que la perte de production soit de 50 % pour  $T=4^{\circ}\text{C}$  (à comparer aux 4 % que donne la paramétrisation de Nordhaus). Ils défendent leur paramétrisation à l'aide de deux arguments : plusieurs points de basculement (*tipping points*) physiques cruciaux pourraient être franchis avant  $+4^{\circ}\text{C}$  ; les impacts d'un tel réchauffement pourraient inclure de vastes mouvements de population, des conflits et des crises sociales de grande ampleur.

Sans surprise, les résultats sont extrêmement sensibles à ces choix. Le coût social du carbone est beaucoup plus élevé qu'avec le DICE original, que ce soit avec une spécification des dommages à la Weitzman ou avec la recalibration de la fonction de coût quadratique proposée par Dietz et Stern [2015]. Nordhaus [2018a] reconnaît facilement cela, mais insiste, pour défendre sa paramétrisation, sur le fait qu'aucune étude disponible à ce jour ne donne des dommages aussi élevés, et qu'il n'y a donc pas de base solide pour les fonctions à grands dommages : *« it It should be noted that the optimal policy depends crucially on the assumed damage function. If the damage function shows higher costs, or has sharp curvature at or around  $2^{\circ}\text{C}$ , as is implicitly assumed in international policies that have a  $2^{\circ}\text{C}$  target, then the revised optimal policy would have much higher abatement, and the temperature-limit and Stern policies would be much more economically attractive. However, current damage studies do not at present display either of these features (see Nordhaus and Moffat [2017]) »*. Il me semble que ceci n'est pas étonnant, car les études existantes ne peuvent que mesurer les effets de chocs sur la météo (sécheresses, ouragans...) et pas les effets d'un réchauffement climatique de grande ampleur, encore jamais expérimenté à l'échelle humaine.

D'autres travaux, datant des années 2000, se sont attachés à introduire une croissance endogène dans DICE. Plus récemment, Dietz et Stern [2015] examinent les conséquences de deux spécifications différentes, dont une spécification à la Romer avec apprentissage par la pratique<sup>5</sup>. La calibration de ce type de modèles est notoirement très difficile.

D'autres travaux encore modifient le modèle climatique de DICE (cycle du carbone et température) pour en améliorer la pertinence au regard des connaissances les plus récentes.

Citons pour conclure cette liste non exhaustive le travail de Sterner et Persson [2008]. Les auteurs modifient DICE pour distinguer deux biens, un bien de consommation et un bien environnemental (la qualité de l'environnement), à la Guesnerie [2004]. Ceci leur permet d'étudier les conséquences d'un changement au cours du temps du prix relatif des deux biens. La fonction d'utilité devient  $\frac{1}{1-\gamma} u(c_t, Am_t)^{1-\gamma}$  où  $Am_t$  sont les aménités environnementales à la période  $t$ .  $u$  est une fonction CES avec une élasticité de substitution entre la consommation de biens marchands et les aménités

5. Voir le texte d'Antoine d'Autume sur Paul Romer, co-récepteur du prix Nobel d'économie 2019, dans ce numéro.

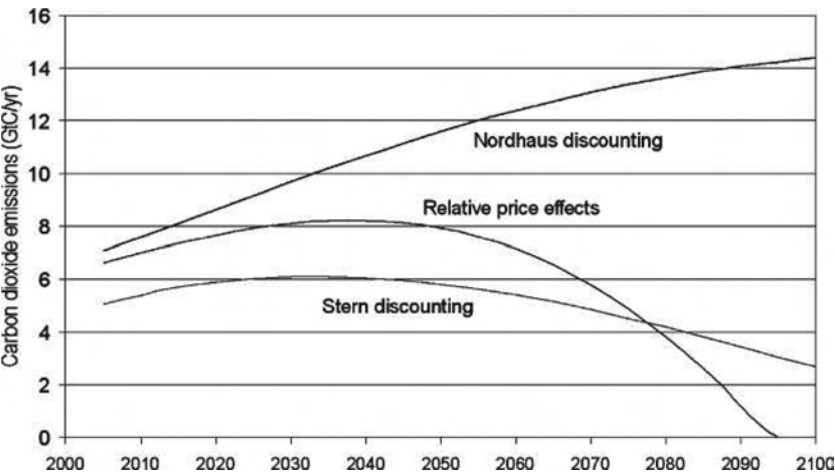
environnementales non marchandes de 0,5, et un poids de ces dernières dans l'utilité de 10 %. L'évolution des aménités environnementales au cours du temps dépend de la température (le changement climatique détruit les espaces naturels) :

$$Am_t = \frac{Am_0}{1 + aT^2}$$

où  $a$  est un paramètre positif. Sur le sentier de croissance BAU la température augmente et la qualité de l'environnement diminue, ce qui provoque des dommages non marchands (en termes de perte d'utilité), en plus des dommages marchands (en termes de perte de production) du modèle DICE standard. Les aménités environnementales diminuant, leur prix relatif augmente. L'effort optimal d'abattement est donc plus élevé.

La figure 3 montre l'évolution des émissions dans le scénario optimal, avec le modèle DICE standard (*Nordhaus discounting*), avec le modèle DICE standard dans lequel le taux de préférence pour le présent est celui de Stern (*Stern discounting*) et avec le modèle DICE modifié (*relative price effects*), pour le taux de préférence pour le présent de Nordhaus. On voit clairement que l'effet prix relatif a des conséquences tout aussi importantes sur les émissions que le taux de préférence pour le présent.

Figure 3. L'importance de l'effet prix relatif. Source : Sterner et Persson [2008]



4.2. Incertitude, queues épaisses et points de basculement

Dans un domaine comme celui du changement climatique, les incertitudes sont nombreuses et quantitativement importantes. Cependant, les IAM sont

presque tous déterministes et DICE, on l'a vu, ne fait pas exception à la règle. Les modèles déterministes postulent des relations « moyennes » entre les variables, et fournissent des résultats « moyens » au sens statistique. Bien que ceci soit évidemment très important, c'est également très frustrant au regard de l'ampleur des incertitudes en jeu.

Un premier type d'incertitude est l'*incertitude portant sur la structure du modèle*, c'est-à-dire sur les spécifications des équations. La fonction de production est-elle vraiment Cobb-Douglas ? La fonction de dommage vraiment quadratique ? Pour évaluer l'ampleur de cette incertitude, les modélisateurs simulent sous des hypothèses communes plusieurs IAM aux spécifications différentes et examinent la dispersion des résultats. Le GIEC par exemple utilise couramment cette approche.

Un deuxième type d'incertitude est l'*incertitude paramétrique*, c'est-à-dire l'incertitude portant sur la valeur des paramètres et des variables exogènes du modèle. Parmi les paramètres mal connus et dont la valeur a des conséquences potentiellement importantes sur les résultats du modèle, citons les paramètres de la fonction de coût d'abattement, ceux de la fonction de dommages, la sensibilité climatique ou encore les paramètres du cycle du carbone. Quant à l'incertitude sur les variables exogènes, c'est-à-dire principalement, dans DICE, le taux de croissance de la population et le taux de croissance de la productivité globale des facteurs, c'est en réalité une incertitude sur le scénario d'évolution de l'économie mondiale à un horizon de plusieurs centaines d'années. Il est clair qu'à un tel horizon prévoir l'évolution des technologies et de la population est très périlleux<sup>6</sup>. Or le scénario de référence retenu a potentiellement un grand impact sur le CSC et les autres résultats du modèle.

Pour ce deuxième type d'incertitude, les modélisateurs effectuent des analyses de sensibilité plus ou moins sophistiquées. L'analyse la plus basique consiste à sélectionner le paramètre mal connu dont on veut évaluer l'impact, à choisir quelques valeurs différentes de ce paramètre et à simuler le scénario de référence et les scénarios de politique climatique pour ces valeurs, afin d'évaluer la sensibilité des résultats. Les analyses plus élaborées utilisent des méthodes de Monte Carlo. Pour les valeurs de chacun des paramètres d'intérêt une distribution de probabilité est obtenue à partir d'une revue de littérature. Puis des simulations de Monte Carlo sont effectuées pour obtenir les distributions de probabilité des résultats<sup>7</sup>. Deux exemples récents utilisant DICE sont Dietz et Stern [2015] et Nordhaus [2018a].

Dietz et Stern [2015] concentrent leur analyse sur la sensibilité climatique d'équilibre  $\eta/\xi_2$ . Ils effectuent deux types d'exercice : une analyse de sensibilité simple dans laquelle sont explorées les conséquences sur les résultats de valeurs différentes de celle-ci (1,5, 3 et 6, sachant qu'elle vaut 3,1 dans

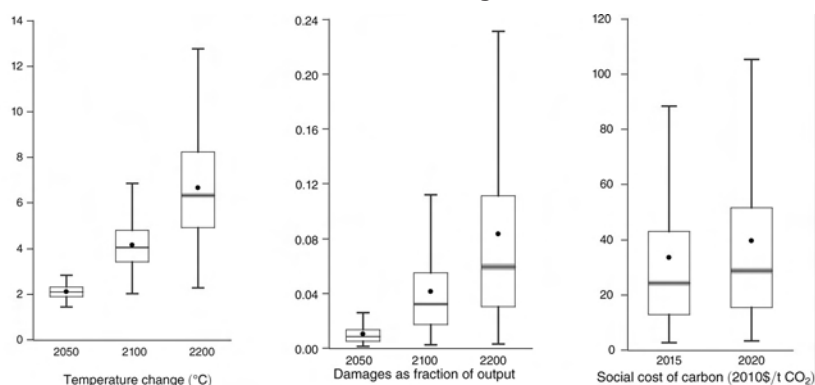
6. En amont, faire l'hypothèse que les technologies futures et même la croissance de la population sont indépendantes de la politique climatique et de l'augmentation de la température est également périlleux.

7. Ces méthodes sont très gourmandes en temps de calcul, et donc pratiquement impossibles à appliquer sur les IAM de plusieurs milliers d'équations.

DICE<sup>8</sup>), et une analyse plus élaborée dans laquelle la valeur certaine de la sensibilité climatique d'équilibre est remplacée par une fonction de densité de probabilité ayant une forte asymétrie positive, c'est-à-dire une queue droite « épaisse ». Les résultats, et en particulier le CSC, sont très sensibles à la valeur de la sensibilité climatique. Une valeur élevée combinée à une fonction de dommages à la Weitzman (voir plus haut) conduit à un CSC très élevé et une décarbonisation optimale de l'économie extrêmement rapide.

Dans Nordhaus [2018a] l'incertitude porte sur cinq paramètres : le paramètre du terme quadratique de la fonction de dommage  $\psi_2$ , le taux de croissance de la productivité totale des facteurs  $(A_t - A_{t-1})/A_{t-1}$ , la vitesse de décarbonation, la sensibilité climatique  $\eta/\xi_2$ , la capacité de  $M^U$  à stocker du carbone  $\phi_{12}$ . Pour chacun des paramètres 5 valeurs sont sélectionnées au sein d'une distribution de probabilité. La figure 4 présente les « boîtes à moustache » (*boxplot*) obtenues pour la température, les dommages en pourcentage de la production et le CSC. La très grande dispersion des résultats et l'asymétrie des distributions sont frappantes.

**Figure 4. Boîtes à moustache de l'analyse de sensibilité de DICE.**  
Source : Nordhaus [2018a], figures 7A et 7B



Lecture : La ligne dans la boîte représente la médiane de la distribution, la région ombrée autour de la médiane représente son erreur standard. Le point représente la moyenne. La boîte représente l'intervalle interquartile ( $Q_3 - Q_1$ ), les barres supérieure et inférieure sont  $Q_1 + 1,5 (Q_3 - Q_1)$  et  $Q_3 - 1,5 (Q_3 - Q_1)$ . Pour une distribution normale ces barres contiennent 99,2 % de la distribution.

Gillingham *et al.* [2018] évaluent les conséquences des deux types d'incertitude de façon systématique. Ils simulent 6 IAM, dont DICE, représentatifs des modèles utilisés par le GIEC dans son cinquième rapport (IPCC [2014]),

8. Le GIEC indique que la sensibilité climatique d'équilibre est « likely » entre 1,5 and 4, 5°C (ce qui signifie que la probabilité subjective est comprise entre 0.66 and 1), « extremely unlikely » inférieure à 1°C (probabilité inférieure à 0,05), « very unlikely » supérieure à 6°C (probabilité inférieure à 0,1) (IPCC [2013]).

pour traiter l'incertitude portant sur la structure du modèle. Ils spécifient à partir de travaux existants des distributions de probabilités de la sensibilité climatique, la population et le taux de croissance de la productivité pour traiter l'incertitude paramétrique. Ils en déduisent avec chaque modèle des distributions de probabilité pour la concentration de CO<sub>2</sub>, la température, les dommages, le coût social du carbone, la consommation par tête, la production et obtiennent donc une mesure de l'incertitude sur les résultats principaux du modèle due à l'incertitude sur les trois paramètres. Ils examinent également la dispersion des résultats entre les modèles, et concluent que l'incertitude paramétrique joue un rôle plus important que l'incertitude sur le modèle, ce qui n'est pas *a priori* intuitif. Concernant l'incertitude paramétrique, ils obtiennent que c'est l'incertitude sur la croissance économique future qui a l'impact le plus grand sur les résultats, avant celles sur la croissance de la population et la sensibilité climatique.

Les analyses de sensibilité à l'aide de méthodes de type Monte-Carlo permettent donc d'aller au delà de l'approche « moyenne » caractéristique des modèles déterministes et d'évaluer les conséquences de l'incertitude paramétrique. Mais elles ignorent l'aversion pour le risque de la société, ce qui peut être très trompeur si celle-ci est grande (voir par exemple Weitzman [2009]), et elles ne sont d'aucune aide pour comprendre les conséquences d'événements extrêmes catastrophiques et de perturbations physiques abruptes et irréversibles (Lenton *et al.* [2008]). Pour pallier ce problème quelques modèles stochastiques issus de DICE ont été construits.

Traeger [2014] présente une reformulation de DICE sous forme de problème de programmation dynamique stochastique en horizon infini dans lequel le nombre de variables d'état est réduit au moyen d'approximations des modules de cycle du carbone et de température, et qui introduit des préférences de type Epstein-Zin-Weil pour distinguer aversion pour le risque et aversion aux fluctuations intertemporelles (4-States DICE). Jensen et Traeger [2014] utilisent ce modèle pour évaluer les conséquences sur le CSC de l'incertitude sur le taux de croissance futur de l'économie, c'est-à-dire sur le scénario économique de référence. Sans surprise, le CSC augmente, par un effet de précaution. Lemoine et Traeger [2014] introduisent dans ce modèle un point de basculement dans le système climatique (qui peut être par exemple dû à la fonte de la calotte glaciaire qui provoque une augmentation brutale et irréversible du niveau des mers). Il s'agit d'un changement irréversible qui apparaît quand un seuil de température est franchi. Initialement, le planificateur ne connaît pas ce seuil. Mais, au fur et à mesure que le temps passe et que la température augmente, il acquiert de l'information en observant que ce seuil n'est pas franchi. La probabilité instantanée de franchissement du seuil est endogène. Elle dépend de la température, qui à son tour dépend de la politique climatique et de la dynamique du cycle du carbone. Les auteurs montrent que la possibilité d'apparition de points de basculement augmente sensiblement le taux de croissance du CSC, par un mécanisme de type assuranciel. Lemoine et Traeger [2016] étendent ces analyses à plusieurs points de basculement différents, avec un possible effet domino, la réalisation d'un changement de régime pouvant précipiter celle d'un autre.

Enfin, le modèle de Cai et Lontzek [2019], *DSICE Dynamic Stochastic Integration of Climate and the Economy*, est un modèle de croissance stochastique, formulé comme un problème de programmation dynamique stochastique. À l'inverse de ce qui est fait dans 4-*Stated DICE*, les auteurs ne cherchent pas à simplifier le modèle pour réduire le nombre de variables d'état et vaincre ainsi la malédiction de la dimension, mais utilisent des algorithmes de calcul numérique très sophistiqués qui leur permettent de réduire le temps de calcul et de simuler le modèle en un temps raisonnable. Les préférences sont de type Epstein-Zin-Weil. Pour prendre en compte le risque économique, le taux de croissance de la productivité totale des facteurs est stochastique. Pour prendre en compte le risque climatique, des points de basculement sont introduits. Enfin, l'incertitude paramétrique est traitée à l'aide d'analyses de sensibilité (simulations de Monte Carlo). Ils obtiennent un CSC qui est lui-même stochastique.

### 4.3. Désagrégation

Le changement climatique aura des conséquences très différentes dans les différentes régions du monde, en raison de la grande hétérogénéité de leurs caractéristiques géographiques et économiques. Nordhaus propose très tôt une version régionalisée de *DICE* (*RICE*, Nordhaus et Yang [1996]). *RICE* permet de comparer les effets du changement climatique dans les différentes régions dans le scénario BAU, dans le cas d'une politique climatique coopérative et à l'équilibre non coopératif.

Parmi les nombreuses extensions de *RICE* je me contenterai d'en citer deux qui sont particulièrement originales. *C-DICE* (Nordhaus [2015]) tout d'abord, qui permet d'examiner la formation de clubs climatiques. *NICE* (*Nested Inequalities Climate-Economy model*) ensuite (Dennig *et al.* [2015]), qui étend le modèle *RICE* en introduisant des agents hétérogènes. Les auteurs distinguent 5 classes de revenus par région. Le point central est la corrélation entre la distribution des revenus et la distribution des dommages climatiques dans chaque région. Si la distribution des dommages est fortement asymétrique c'est-à-dire que les dommages touchent beaucoup plus fortement les pauvres, le sentier de consommation des pauvres dans le scénario BAU peut être très différent du sentier de consommation moyen de la population, et peut même être décroissant alors que l'économie croît en moyenne. Dans ce cas, les efforts d'abatement optimaux sont plus élevés que dans le modèle à agent représentatif, et le CSC est également plus élevé.

## 5. Conclusion

William Nordhaus est un précurseur. Il a fondé l'économie du changement climatique, en bâtissant un cadre d'analyse quantifiée simple et puissant,

capable d'accommoder toutes les extensions possibles tout en restant maîtrisable. Il a posé les bases de la modélisation intégrée pluridisciplinaire. Son influence est considérable et sa postérité déjà très grande. L'utilité de DICE pour la compréhension des mécanismes du changement climatique et la conception de la politique climatique est indéniable. Son utilité pour l'évaluation du coût social du carbone à un horizon très long est moins claire, tant les incertitudes sont grandes, sur l'évolution de l'économie et en particulier le progrès technique, et sur les possibles non-linéarités et irréversibilités physiques. Mais Nordhaus a ouvert la voie pour des travaux moins focalisés sur des phénomènes et des résultats moyens, prenant réellement en compte l'incertitude et la possibilité d'événements extrêmes irréversibles, décrivant l'ensemble des futurs possibles, même les plus catastrophiques, et permettant d'analyser les politiques économiques susceptibles de nous protéger de ces futurs catastrophiques.

## Références bibliographiques

- ARCHER D., EBY M., BROVKIN V., RIDGWELL A., CAO L., MIKOLAJEWICZ U., CALDEIRA K. *et al.* [2009], Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 37, 117-134.
- ARRHENIUS S. [1896], On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(5), 237-276.
- ARROW K., CLINE W., MÄLER K.-G., MUNASINGHE M., SQUITIERI R. et STIGLITZ J. [1996], Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency, in: *Climate Change 1995, Economic and Social Dimensions of Climate Change*, éd. par J. Bruce, H. Lee et E. Haites, Cambridge University Press, Cambridge.
- CAI Y. et LONTZEK T. [2019], The social cost of carbon with economic and climate risks, *Journal of Political Economy*, à paraître.
- CHRISTENSEN P., GILLINGHAM K. et NORDHAUS W. [2018], Uncertainty in forecasts of long-run productivity growth, *Proceedings National Academy of Sciences*, 115(21), 5409-5414.
- DASGUPTA P. et HEAL G. [1974], The Optimal Depletion of Exhaustible Resources, *Review of Economic Studies*, 41(5), 3-28.
- DENNIG F., BUDOLFSON M. B., FLEURBAEY M., SIEBERT A. et SOLOW R. H. [2015], Inequality, climate impacts on the future poor, and carbon prices, *Proceedings of the National Academy of Science*, 112(52), 15827-15832.
- DIETZ S. et STERN N. [2015], Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: How Nordhaus framework support deep cuts in carbon emissions, *The Economic Journal*, 125, 574-620.
- GILLINGHAM K., NORDHAUS W. D., ANTHOFF D., BLANFORD G., BOSETTI V., CHRISTENSEN P., MCJEON H., REILLY J. et SZTORC P. [2018], Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multi-Model Comparison, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(4), 791-826.
- GUESNERIE R. [2004], Calcul économique et développement durable. *Revue Économique*, 55(5), 363-382.

- IPCC [2013], Summary for policymakers, in (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley, eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- IPCC [2014], *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva.
- JENSEN S. et TRAEGER C. [2014], Optimal climate change mitigation under long-term growth uncertainty: Stochastic integrated assessment and analytical findings, *European Economic Review*, 69, 104-125.
- JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES [2015], Correction to Richard S. Tol's "The Economic Effects of Climate Change." *Journal of Economic Perspectives*, 29(1), 217-220.
- LEMOINE D. et TRAEGER C. [2014], Watch your step: optimal policy in a tipping climate, *American Economic Journal: Economic Policy*, 6, 137-166.
- LEMOINE D. et TRAEGER C. [2016], Economics of Tipping the Climate Dominoes, *Nature Climate Change*, 6(5), 514-519.
- LENTON T., HELD H., KRIEGEL E., HALL J., LUCHT W., RAHMSTORF S. et SCHELL-NHUBER H. J. [2008], Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6): 1786-1793.
- LONTZEK T., CAI Y., JUDD K. L. et LENTON T. M. [2015], Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Indicates the Need for Strict Climate Policy, *Nature Climate Change* 5, 441-444.
- MANNE A. S. [1976], ETA: A Model for Energy Technology Assessment, *Bell Journal of Economics*, 7(2), 379-406.
- NORDHAUS W. D. [1975], Can We Control Carbon Dioxide? International Institute for Applied Systems Analysis Working Paper, WP 75-63.
- NORDHAUS W. D. [1977], Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide, *American Economic Review*, 67(1), 341-346.
- NORDHAUS W. D. [1991], To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect, *Economic Journal*, 101(407), 920-937.
- NORDHAUS W. D. [1992], An optimal transition path for controlling greenhouse gases, *Science*, 258 (5086), 1315-1319.
- NORDHAUS W. D. [1993a], Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the "dice" model, *American Economic Review*, 83(2), 313-317.
- NORDHAUS W. D. [1993b], Rolling the "dice": an optimal transition path for controlling greenhouse gases, *Resource and Energy Economics*, 15(1), 27-50.
- NORDHAUS W. D. [1994], *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, Cambridge, MA: MIT Press.
- NORDHAUS W. D. [2015], Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy, *American Economic Review*, 105(4), 1339-1370.
- NORDHAUS W. D. [2018a], Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies, *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333-360.
- NORDHAUS W. D. [2018b], Evolution of modeling of the economics of global warming: changes in the DICE model, 1992-2017, *Climatic Change*, 148(4), 623-640.

- NORDHAUS W. D. et MOFFAT A. [2017], A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis, National Bureau of Economic Research Working Paper 23646.
- NORDHAUS W. D. et YANG Z. [1996], A regional dynamic general-equilibrium model of alter-native climate-change strategies. *American Economic Review*, 86(4), 741-765.
- OLSEN R., SRIVER R., GOES M., URBAN N. M., MATTHEWS H. D., HARAN M. et KELLER K. [2012], A climate sensitivity estimate using Bayesian fusion of instrumental observations and an Earth System model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D4).
- PINDYCK R. S. [2013], Climate change policy: what do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872.
- PINDYCK R. S. [2017], The Use and Misuse of Models for Climate Policy, *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100-114.
- SOLOW R. [1974], Intergenerational Equity and Exhaustible Resources, *Review of Economic Studies*, 41(5), 29-45.
- STERN N. [2007], *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge: Cambridge University Press.
- STERN N. [2008], The economics of climate change, *American Economic Review: Papers and Proceedings*, 98(2), 1-37.
- STERNER T. et PERSSON U. M. [2008], An even sterner review: introducing relative prices into the discounting debate, *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1), 61-76.
- STIGLITZ J. [1974], Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths, *Review of Economic Studies*, 41(5), 123-137.
- TRAEGER C. [2014], A4-stated DICE: Quantitatively Addressing Uncertainty Effects in Climate Change, *Environmental and Resource Economics*, 59, 1-37.
- TOL R. S. J. [2009], The Economic Effects of Climate Change, *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 29-51.
- WEITZMAN M. [2009], On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change, *Review of Economics and Statistics*, 91(1), 1-19.
- WEITZMAN M. [2012], GHG targets as insurance against catastrophic climate damages, *Journal of Public Economic Theory*, 14(2), 221-244.